

**PLANEACIÓN ÓPTIMA DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA
USANDO DANTZIG-WOLFE**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
PLANEACIÓN ÓPTIMA DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA
USANDO DANTZIG-WOLFE**

**AUTOR:
SANTIAGO ALEXANDER FREIRE SALAZAR**

**DIRECTOR:
WILSON DAVID PAVÓN VALLEJOS**

Quito, julio 2019

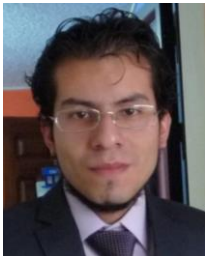
SANTIAGO ALEXANDER FREIRE SALAZAR

**PLANEACIÓN ÓPTIMA DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA
USANDO DANTZIG-WOLFE**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2019

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



SANTIAGO ALEXANDER FREIRE SALAZAR (Y'1991 – M'10). Culminó sus estudios de bachillerato en el Colegio Experimental “Juan Pío Montúfar” de la ciudad de Quito, obteniendo el título en Físico-Matemático. Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el estudio de alternativas a las metodologías tradicionales para la optimización en las Redes de Distribución Eléctrica. sfreires@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



WILSON DAVID PAVÓN VALLEJOS (Y'1989). Actualmente es docente a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. Obtuvo su título de tercer nivel en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE como Ingeniero Electrónico en Automatización y Control. Obtuvo su título de cuarto nivel en la Universidad de Newcastle upon Tyne como Magister en Automatización y Control. wpavon@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

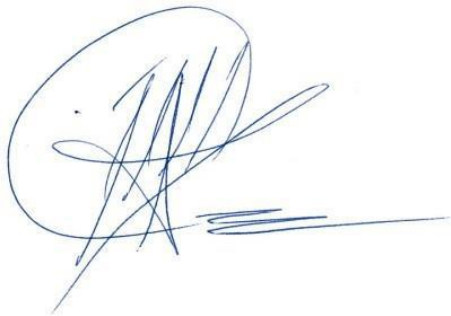
©2019 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, WILSON DAVID PAVÓN VALLEJOS declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*PLANEACIÓN ÓPTIMA DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA USANDO DANTZIG-WOLFE*” realizado por SANTIAGO ALEXANDER FREIRE SALAZAR, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Julio de 2019



.....

WILSON DAVID PAVON VALLEJOS

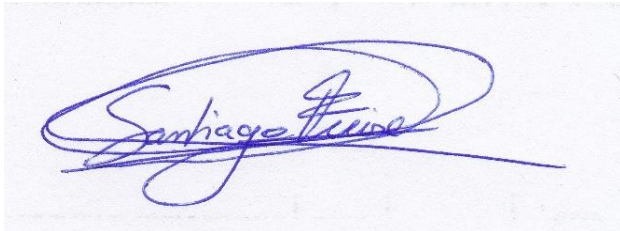
C.C.: 1719224311

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, SANTIAGO ALEXANDER FREIRE SALAZAR, con documento de identificación N° 172059160-9, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “*PLANEACIÓN ÓPTIMA DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA USANDO DANTZIG-WOLFE*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, Julio de 2019



.....

SANTIAGO ALEXANDER FREIRE SALAZAR

C.C.: 172059160-9

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	2
MARCO TEÓRICO	6
2.1 Descomposición de Dantzig-Wolfe	6
2.2 K Means	9
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
ANÁLISIS DE RESULTADOS	13
4.1 Antes de la Optimización	15
4.2 Después de la Optimización	15
4.3 Análisis de Caídas de Tensión, Cargabilidad y Pérdidas del SED	15
CONCLUSIONES	20
5.1 Investigaciones Posteriores	21
REFERENCIAS	21
6.1 Matriz de Estado del Arte	25
6.2 Resumen de Indicadores	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Caso típico de Generación Distribuida propuesto para la Optimización	6
Figura 2 - Integración de Generación Distribuida en Pedernales	10
Figura 3 - Conexiones Posibles entre puntos de Generación y puntos de Carga.....	11
Figura 4 - Optimización de Conexiones de los puntos de Generación y puntos de Carga	12
Figura 5 - Distribución Óptima de los Primarios o Conexiones en Pedernales	14
Figura 6 - Simulación del SED antes de la Optimización.....	17
Figura 7 - Simulación de SEP después de la Optimización	18
Figura 8 - Voltaje en Barras de Generación y Nodos de Carga	19
Figura 9 – Cargabilidad de Líneas de Conexión	19
Figura 10 – Pérdidas en Líneas de Conexión.....	20
Figura 11. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte	29
Figura 12. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	30
Figura 13. Indicador de solución - Estado del arte	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Datos de Generadores	14
Tabla 2 - Datos de Cargas	14
Tabla 3 - Datos de Líneas de Conexión	15
Tabla 4 - Matriz de Conectividad.....	15
Tabla 5. Matriz de Estado del Arte	25

PLANEACIÓN ÓPTIMA DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA USANDO DANTZIG-WOLFE

Resumen

El presente artículo muestra la factibilidad de uso del algoritmo de descomposición de Dantzig-Wolfe, aplicado en el ámbito eléctrico, específicamente en un Sistema Eléctrico de Distribución (SED), mostrando sus efectos de uso ante las caídas de voltaje. El modelo se realiza utilizando la herramienta Matlab, y el flujo de potencia del sistema se simula en el software DlgSilent Power Factory, para su posterior análisis de caídas de tensión. La implementación del algoritmo de Dantzig-Wolfe se lo realiza con el objetivo de minimizar el precio de producción de la energía de fuentes renovables, presentes en la Generación Distribuida (GD), en función de la distancia que tiene que recorrer cada punto de Generación hacia cada punto de Carga, manteniendo de esta manera la eficiencia energética y su demanda requerida. Los resultados obtenidos presentan una alternativa de optimización para la planificación de redes de Distribución Eléctrica con incorporación de Generación Distribuida.

Palabras Clave: Dantzig-Wolfe, Generación Distribuida, Optimización, Sistema Eléctrico de Potencia, Caída de Tensión.

Abstract

The present article shows the feasibility of using the Dantzig-Wolfe decomposition algorithm, applied in the electrical field, specifically in an Electric Distribution System (EDS), showing its effects of use before voltage drops. The model is implemented using Matlab tool, and the power flow of the system is simulated in DlgSilent Power Factory software, for its subsequent analysis of voltage drops. The implementation of the Dantzig-Wolfe algorithm is done with the purpose of minimizing the energy production price from renewable sources, present in the Distributed Generation (DG), depending on the distance that each Generation point has to travel to each point of Load, thus maintaining energy efficiency and its required demand. The results show an optimization alternative for the planning of Electric Distribution networks with the incorporation of Distributed Generation.

Keywords: Dantzig-Wolfe, Distributed Generation, Optimization, Electrical Power System, Power System, Voltage Drop.

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de distribución eléctrica actualmente han tenido una atención más profunda debido a que deja de ser un simple punto de interconexión entre la red de transmisión de energía y el consumidor, para ser un sistemas de gran importancia, tanto en zonas urbanas y rurales, y también en redes inteligentes desde el punto de vista de los servicios eléctricos como el de los clientes; consecuentemente, uno de los principales inconvenientes de la planificación a largo plazo en los sistemas de distribución, es su sensibilidad a factores como el pronóstico de carga futura, la administración de activos así de como también las restricciones económicas; por tal motivo, es fundamental que se realizó evaluaciones en periodos determinados a la planificación de la red [1].

El hablar de una red avanzada implica que su infraestructura sea robusta y eficiente, más cuando esta se ha planeado óptimamente tomando en cuenta el objetivo de la red con sus respectivas condiciones o restricciones, que podrían ser físicas, económicas, entre otras variables. Estas redes avanzadas deben necesariamente mantener un equilibrio económico en su operación, tomando en cuenta este tipo de variables y contingencias frente a la demanda y pérdidas que puedan ocurrir en el desempeño del sistema. Esto se alcanza por medio de la operación dinámica de la red, minimizando óptimamente los costos de inversión, operación y mantenimiento [2]. Los modelos de planificación de la expansión de la red de distribución por lo general buscan alcanzar una planificación

de inversión mínima en todo su recorrido, considerando los recursos adicionales, reforzados o reemplazados para el sistema existente, donde se trata de que, a pesar de estas adiciones, se conserve los estándares de demanda con un alto grado de calidad y seguridad; es así como entonces, el problema radica en encontrar el lugar y el momento preciso; y de que dimensiones, se ingresa en la red, como por ejemplo, una subestación [3].

Las redes de distribución eléctrica, a largo plazo, desarrollan configuraciones que se apartan de la planificación original. La planificación de expansión por lo general se enfoca en tres aspectos: el primero, en el diseño óptimo para la expansión de la red de distribución, que sea capaz de abastecer al crecimiento de las cargas iniciales así de cómo suministrar energía a futuras cargas; el segundo es la estructura de la planificación considerando un consumo real, pero sin que exista una red real, también conocida como planificación de operación; y la tercera, la optimización del funcionamiento de la red existente considerando diferentes combinaciones operativas, disminuyendo las pérdidas del sistema en un tiempo definido [4].

La planificación de la expansión de la red de distribución se enfoca a la minimización del costo operacional y capital del plan de expansión; una planificación de expansión involucra que se seleccione los óptimos caminos de construcción de las líneas y el tipo de conductor que se va a utilizar, junto con la instalación de la subestación y el reforzamiento que permitan satisfacer la demanda de la manera más económica,

confiable y respetuosa con el medio ambiente, sin verse afectadas por condiciones físicas y técnicas de la expansión de la red [5], [6].

Durante el desarrollo de las redes de distribución, pueden aparecer nuevos transformadores de distribución en diferentes locaciones que tienen más probabilidades de conexión a la red, siendo esto un problema de localización geográfica de estos transformadores de distribución en un área establecida, donde debe por lo general ser de un área de suministro a un transformador de distribución; todo esto conlleva a una localización óptima de los transformadores de distribución y a la configuración del alimentador [7].

La planificación y operación de las redes de distribución, exige que los transformadores utilizados tienen que ser optimizados en el aspecto en que estos deben ser adecuadamente posicionados y dimensionados, al igual que los conductores deben soportar estas capacidades de dimensionamientos, por los criterios de que su resistencia incrementa directamente proporcional al aumento de la temperatura de los conductores [8]; en [9] la capacidad de los transformadores se determina considerando el consumo de carga promedio y su temperatura, sin embargo, bajo presencia de cargas no lineales, cuando se incrementa las distorsiones de la corriente y del voltaje, produce un aumento considerable en las potencias de pérdidas, y de igual manera, incrementa su temperatura, disminuyendo su vida útil a ritmos vertiginosos; por otro lado en [10] la demanda en los sistemas de distribución eléctrica se modela a través

de aproximaciones lineales, tanto en partes reales e imaginarias de la tensión, teniendo en consideración las condiciones de operación típicas del sistema de distribución eléctrica; en [11] el modelado de la demanda de electricidad doméstica para estudios de Generación Distribuida en un lugar determinado, en un gran número de hogares individuales, es una tarea compleja. En una reproducción realista debe captarse el comportamiento estocástico de la demanda; más específicamente en términos de variaciones entre hogares, distribución de niveles de demanda para diferentes usos finales a lo largo del tiempo, variaciones en temporadas y días, diferencias entre días de semana y fines de semana; y coincidencia de carga. Para resolver el problema, el uso de la electricidad en un solo hogar depende de tres factores:

- a) El conjunto de aparatos del hogar,
- b) La demanda individual de electricidad de estos aparatos, y
- c) El uso de los aparatos.

Con el conocimiento adecuado de estos factores, se puede determinar la electricidad utilizada en un hogar. El más complejo e impredecible de estos es sin duda el factor de comportamiento (c).

La introducción de la Generación Distribuida (DG), en redes de bajo voltaje, abre la posibilidad de suministrar servicios auxiliares para ayudar a la administración de la red y para mantener la calidad de la energía, sin embargo, la propia DG puede causar dificultades en la magnitud del voltaje cuando se inyecta energía real en redes con alto cociente

resistencia-reactancia (R/X), (teniendo en consideración que esto puede mejorar controlando la inyección de Potencia Reactiva), por lo que es necesario dar este soporte solo en condiciones límite de voltaje para evitar fluctuaciones de Potencia Reactiva innecesarios en las condiciones normales. También hay que hacer importante énfasis en que las redes de bajo voltaje de alta impedancia relativa son propensas a la distorsión armónica de las cargas no lineales, para lo cual una de las soluciones es la emulación de resistencia, y controlando el inversor de manera que compensen los armónicos posibles mejorando la calidad de voltaje [12].

En [13] la cantidad máxima de energía activa suministrada por los generadores distribuidos en cada bus del sistema sin causar infracciones o incrementos de voltaje se puede determinar utilizando una sola solución de flujo de potencia y una operación de matriz a través la operación matemática simultánea de Voltajes en Potencia Activa y Reactiva, para evitar flujos de potencia repetitivos.

La generación distribuida además debe cumplir con ciertos criterios técnicos sin los cuales no se puede integrar adecuadamente a la red: debe ser capaz de resistir caídas de tensión y en general, las variaciones de voltaje que estos pueden ocasionar, debe ser respaldada por varios tipos de generación; también se debe proporcionar una medición separada para la producción y el consumo (Medidor Bidireccional), independientemente de que los usuarios deseen aportar con energía a la red [14].

En la actualidad, las redes de distribución experimentan cambios

considerables debido al incremento de soluciones inteligentes, como consecuencia, se tiene una red mucho más compleja dando como resultado una planificación mucho más elaborada [15].

La planificación de redes de distribución es muy compleja que implica diversos factores para su desarrollo, factores como problemas técnicos y económicos, factores medioambientales limitantes y factores de calidad energética; las configuraciones posibles de la red, depende del enrutamiento, la ubicación de las subestaciones y las unidades de generación distribuida si es necesario, las localizaciones de los puntos de carga y en general su estructura [16], [17].

La planificación urbana en países de desarrollo o subdesarrollados son por lo general muy impredecibles, esto conlleva que la implementación o el diseño de una red a futuro, ya no sea solo un problema social, sino también económico debido al incremento de los costos dentro de operaciones, cortes y pérdidas en este tipo de sistemas [18].

Existe riesgo en la planificación del sistema de distribución cuando existe incertidumbres técnicas y financieras, es por eso que la planificación del sistema de distribución eléctrica así de como su diseño económico y confiable, supone un desafío muy importante para las empresas de distribución eléctrica. La planificación de las redes de distribución se divide en dos subproblemas, además de la localización de la subestación y el enrutamiento del o los alimentadores [19].

La función de eficiencia de diferentes fuentes de energía no reversibles

(aquellas fuentes de energía que no son capaces de recuperar energía, como celdas de combustible, red eléctrica y los motores de combustión) a diferencia de las fuentes de energía reversibles (aquellas que pueden recuperar energía como las baterías y supercapacitores), pueden presentar características o comportamientos muy diferentes entre sí.

La función de eficiencia se utiliza para calcular el costo total de energía de un proyecto y poder minimizarlo, por lo que es necesario identificar la mejor combinación entre la planificación y la utilización de los recursos energéticos; sin embargo, la función de eficiencia tiene que resolverse por separado debido a sus instancias que se originan al ser una función no lineal [20].

Por otro lado, la introducción estratégica de generación fotovoltaica, integrada en edificaciones, que se conectan a la red, generan ciertas ventajas frente a la generación hidráulica, debido a la compensación de picos que se dan en horas sol, y la planificación de una futura expansión [21], sin embargo, este tipo de generación debe ser contralada debido a que los niveles de voltaje pueden afectar al flujo de potencia dentro del sistema de distribución [22], [23]; las energías que dependen del clima, sin embargo, implican riesgos de inversión propias de su implementación, así como también riesgos de inversión sobre otros tipos de generación, debido al impacto sobre los precios de producción, siendo así un problema potencial en acciones de inversión dentro del mercado eléctrico. Por lo tanto, una comparación es necesaria entre los riesgos de inversión de sistema aislado y un sistema conectado a

la red, donde la generación aislada presenta un mayor riesgo de inversión (para las empresas o firmas privadas) frente a un sistema que se conecta a la red [24].

A partir de aquí se considera de gran importancia y de vital conocimiento, la aplicación de metodologías que permitan la optimización de cualquier tipo de recursos, minimización de costos de inversión [2], [20], [24], o la maximización del rendimiento o ganancia, un objetivo de confiabilidad regido o un cronograma de inversión ajustado que permitan reflejar los objetivos del propietario de una empresa de distribución eléctrica [25].

Este artículo inspeccionará la factibilidad de la operación del método de descomposición de Dantzig-Wolfe en el ámbito eléctrico, en este caso, la planificación óptima de un sistema de Distribución Eléctrica con incorporación de Generación Distribuida, de tal manera que el método refleje la optimización de las conexiones entre las fuentes de generación y áreas de cobertura, como se muestra en la Figura 1. Para ello se seleccionará un área urbana el cual su mapa correspondiente se obtendrá mediante la página online Open Street Map (OSM); el sistema de Generación Distribuida se modelará y simulará en el programa DIgSilent Power Factory versión 15.1 para las verificaciones de flujo de potencia y caídas de tensión que pudiera presentar la optimización de este método; por otro lado, la programación de la optimización a través del método de Dantzig-Wolfe, se desarrollará en el programa MATLAB.

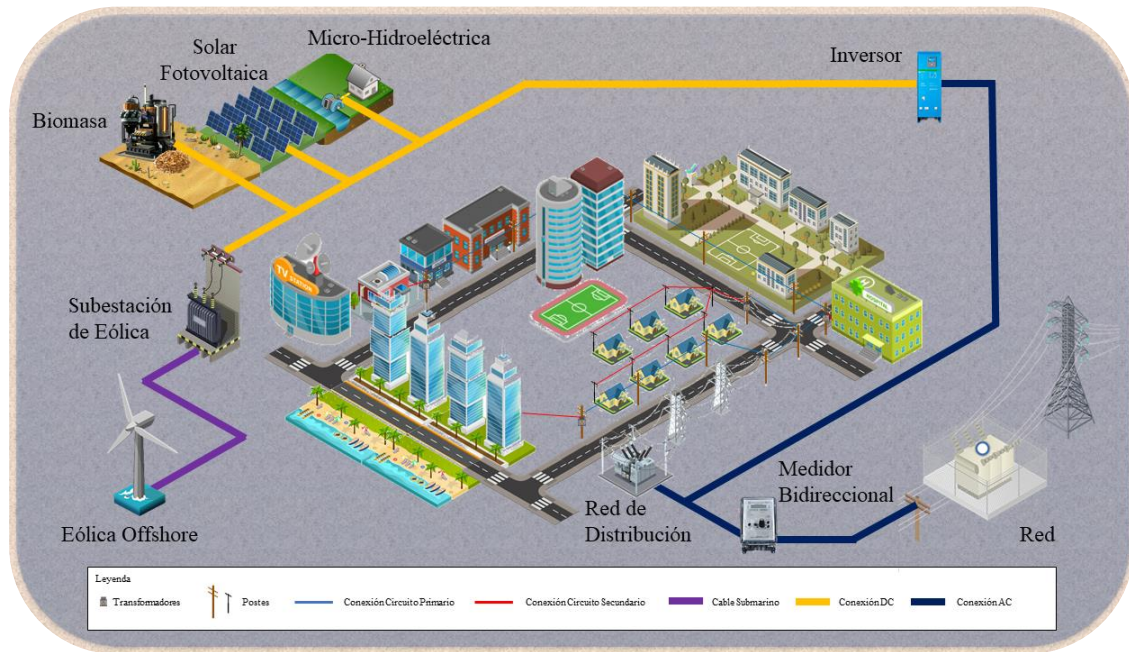


Figura 1 - Caso típico de Generación Distribuida propuesto para la Optimización

El documento se estructura de la siguiente manera: Sección I: Introducción sobre los Sistemas Eléctricos de Distribución y Generación Distribuida. Sección II: Marco Teórico relacionado al método de descomposición de Dantzig-Wolfe. Sección III: Planteamiento del problema de un caso eléctrico para la aplicación del método de Dantzig-Wolfe. Sección IV: Análisis de Resultados. Sección V: Conclusiones y Trabajos Futuros. Sección VI: Referencias y Anexos.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Descomposición de Dantzig-Wolfe

Uno de los métodos de resolución de problemas de programación lineal es el método de Descomposición de Dantzig-Wolfe, es uno de los favoritos debido a su capacidad de solución de la mayoría de problemas de Programación Lineal (LP), entre los ejemplos que utilizan este

método o se basan en ello, se encuentran: el uso de la optimización en la gestión financiera, debido a que bancos y empresas utilizan ampliamente modelos de optimización de cartera para ofrecer sus servicios financieros, para la solución de problemas de cómo diversificar adecuadamente la inversión en diferentes clases de activos, tales como acciones, bonos, bienes raíces y alternativas para cumplir con los pasivos y maximizar los rendimientos deseados [26]; en la producción del papel, donde existen dos procesos diferentes, el primero en la producción de la materia prima, es decir el papel en rollos; y la segunda, en cortar estos rollos en otros de menor tamaño de acuerdo a los requisitos del cliente, sin embargo, ambos procesos se tratarán como al mismo tiempo [27]; en las telecomunicaciones, específicamente para el funcionamiento de una considerable cantidad de máquinas simultáneamente, donde se deben sincronizar adecuadamente para que se pueda almacenar la información de los

procesos y por otro lado que permita la distribución de los análisis científicos, como lo es el programa de física El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) [28]; en sistemas de Distribución, para el control predictivo del modelo económico de subsistemas dinámicamente desacoplados, en donde el problema de control óptimo restringido en cada tiempo de muestreo es considerado como un programa lineal de espacio de estado, límites de entrada, límites de tasa de entrada y límites de salida flexibles. De esta manera se relaciona la función objetivo del programa lineal con el costo de operar los subsistemas y el costo de no cumplir con las restricciones de salida del muestreo [29]; o el mejoramiento del transporte en aerolíneas, en donde se toma de gran importancia la inclusión de una cuarta dimensión para la localización de cada avión es más precisa, mejorando significativamente la capacidad de vuelos y adecuando la gestión del tiempo que tardan en realizar los viajes, consecuentemente, estableciendo un control más preciso de la maniobrabilidad de los aviones, minimizando consumo y posteriormente, reduciendo las emisiones contaminantes [30].

La descomposición de Dantzig-Wolfe es un método de descomposición basado en el método Simplex, del cual toma su característica primordial de realizar iteraciones cada vez más ajustadas al valor deseado resultante, con la añadidura de una columna adicional en el proceso a la cual se denomina generación de columna [31], dicha columna permitirá evaluar constantemente los nuevos valores obtenidos hasta lograr el resultado

factible, sea de una minimización o de una maximización.

El método de Dantzig-Wolfe considera un problema de programación lineal de la siguiente forma:

$$\text{Minimizar } c^T x \quad (1)$$

$$\text{Sujeto a } Ax \leq b \quad (2)$$

$$0 \leq x$$

Donde $c \in \mathbb{R}^n$, $b \in \mathbb{R}^m$, $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ y las inecuaciones $Ax \leq b$ y $0 \leq x$, deben ser interpretadas en forma de componentes.

A, b y c son matrices las cuales su estructura dentro del método de Dantzig-Wolfe se explicará más adelante.

Sin embargo, a diferencia del método Simplex, la matriz A internamente se descompone en un problema maestro y subproblemas; un problema maestro es aquel que contiene la matriz de coeficientes que involucran a la mayor parte de las variables de las inecuaciones, mientras que un subproblema es un conjunto o matriz reducida que contiene a un sistema de ecuaciones con el mismo número de incógnitas o variables de permitan la reestructuración del problema [32], [33].

La matriz A junto con la matriz b resulta ser un sistema de ecuaciones de primer orden donde cada ecuación de A será cada valor de b, sin embargo, cuando es extenso el número de variables dentro de este sistema de ecuaciones, los métodos tradicionales se tornan más complejos; es así como el método de

descomposición de Dantzig-Wolfe optimiza dividiendo este sistema de ecuaciones en otros sistemas más manejables, por lo que al final, estos valores iterarán hasta converger en una solución.

La función objetivo se describe en la función 1, es la que contiene las variables a optimizar (minimización o maximización), y la ecuación 2 representa al conjunto de todas las ecuaciones de condición y restricción que contenga el sistema, permitiendo la solución a la función objetivo.

De forma generalizada, un problema de programación lineal que contenga un extenso número de variables definido como:

$$\text{mín } z = (c^1)^T \cdot x^1 + (c^2)^T \cdot x^2 + \dots + (c^K)^T \cdot x^K$$

Sujeto a las condiciones y restricciones siguientes:

$$\text{s.a } L_1 \cdot x^1 + L_2 \cdot x^2 + \dots + L_K \cdot x^K \leq b^0$$

$$A_1 \cdot x^1 \leq b^1$$

$$A_2 \cdot x^2 \leq b^2$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$A_K \cdot x^K \leq b^K$$

$$x^1 \geq 0 \quad x^2 \geq 0 \quad \dots \quad x^K \geq 0$$

Donde:

K : es el número de subproblemas

L_K : son los submatrices del problema maestro dependientes de K

c^K : son los coeficientes de la función objetivo z

b^K : son los valores delimitadores de las condiciones y restricciones del problema [34], [35].

Algoritmo 1: Dantzig-Wolfe

Paso 1 – Inicio

Paso 2 - Definir valores de matrices A, b y c

Paso 3 - Definir el número de subproblemas K

Paso 4 - Inicialización del método

Generar base inicial B para el problema maestro

Paso 5 - Generación del multiplicador Simplex

Resolver para π en el sistema lineal $B^T \pi = f_B$

Paso 6 - Verificación de optimalidad

Para cada $k = 1, \dots, K$, resolver SP_k .

$$\begin{aligned} \text{minimizar } \sigma_k &= \left((c^k)^T - (\pi^1)^T L_k \right) x^k \\ \text{sujeto a } A_k x^k &\leq b^k \\ x^k &\geq 0 \end{aligned}$$

Si $r_{\min} = \min_{k \in \{1, \dots, K\}} \{r^k_*\} \geq 0$ entonces

FINALIZAR, la actual base B es óptimo

Paso 7 - Generación de Columna

Si $\forall SP_k$ están delimitados y

$$r_{\min} = \min_{k \in \{1, \dots, K\}} \{r^k_*\}$$

∴

t será el índice de k en SP_k tal que

$$\begin{aligned} r_{\min} &= r^t_* \\ \bar{a} &= \begin{bmatrix} q^t_{i^*} \\ e_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_t v^t_{i^*} \\ e_t \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Donde: $v^t_{i^*}$ es el extremo óptimo de SP_t

Paso 8 - Generación de Dirección

Descendente

Resolver para d en el sistema lineal $Bd = -\bar{a}$

Paso 9 - Generación de Longitud de Paso

Calcular la longitud de paso

$$\alpha = \min_{l \in B} \left\{ -\frac{x_l}{d_l} \mid d_l < 0 \right\}$$

(prueba de relación mínima)

Paso 10 - Actualización de variables básicas y Bases

$$x_B = x_B + \alpha d$$

Paso 11 - Actualización Base

B_{l^*} será la columna en B asociada con la variable básica saliente x_{l^*}

Actualizar la matriz de base B eliminando B_{l^*} , agregando la columna \bar{a} y actualizando \bar{B} .

Regresar al paso 5

Paso 12 - Visualización de resultados de la optimización

Paso 13 - FIN

2.2 K Means

El algoritmo de K-Means tiene la capacidad de establecer divisiones de un conjunto global en varios cluster o agrupaciones, de acuerdo a un patrón establecido [36], donde cada agrupamiento se establece minimizando la suma de las distancias euclidianas, y está dado por la ecuación (3)

$$\min \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i}^j d(x, c_g)$$

(3)

Donde:

c_g : Centro de los grupos S_i

$d(x, c_g)$: Distancia Euclidiana entre los puntos x y c_g .

k : Numero de agrupamientos o clusterización.

En el aspecto eléctrico el algoritmo K-Means tiene una importancia crucial, debido a que permite la agrupación de escenarios para modelar por ejemplo la velocidad del viento, la iluminación solar y la demanda de carga, para la incorporación de energías renovables en el Sistema de Distribución [37].

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como punto de partida, se hace énfasis en que el método de Dantzig-Wolfe necesita de una estructura predeterminada para desempeñar adecuadamente su optimización, y esto radica fundamentalmente en el número de ecuaciones condicionantes, esto se explicará más adelante a la hora de establecer el escenario.

Se plantea un sistema de Generación Distribuida ubicado en la parte norte de Pedernales, localizado en el cantón Pedernales de la provincia de Manabí, y se ha escogido este lugar debido a que es un área urbana y tiene los espacios adecuados para la instalación de las fuentes de Energía Renovables para la Generación Distribuida; este tipo de red al ser de Distribución, los voltajes con los que se trabajan por lo general están establecidos como 6.3, 13.8 y 22.8 kV, en la región costa está definido un voltaje de 13.8 kV, el cual será nuestro voltaje de base.

La zona que se ha seleccionado consta de 592 viviendas, este valor se conoce al obtener el mapa OSM y contabilizar el número de casas en Matlab; con este número podemos aproximar nuestra demanda global.

El cálculo de la demanda se describe en la ecuación (4).

$$DD = \frac{DMD + D_{PT} + D_{AP}}{FP} \quad (4)$$

Donde:

DD : Demanda de diseño en los bornes secundarios del transformador (kVA)

DMD : Demanda máxima diversificada considerando la utilización de equipos eléctricos para uso general, cocción y calentamiento de agua.

D_{PT} : Demanda de pérdidas técnicas resistivas (en la red secundaria, en acometidas, en contadores de energía) (kW)



Figura 2 - Integración de Generación Distribuida en Pedernales

Para el efecto del problema, se plantea 4 tipos de generación:

- 1) Eólica Offshore
- 2) Solar Fotovoltaica
- 3) Micro Turbina
- 4) Biomasa

Se propone una planta Eólica Offshore con 10 aerogeneradores de 225 kW de potencia cada una, la cual se dispone a 770 m de la costa produciendo una potencia neta de 2.25 MVA, esta planta se conecta mediante cable submarino a su transformador respectivo en tierra, a una tensión de 13.8 kV.

Se propone una planta Solar Fotovoltaica pequeña con 10 unidades de 800 kW, generando una potencia neta de 8000 MVA.

Se propone una instalación de una Micro Turbina ubicada en el rio cercano que desemboca en la playa de la zona, esta

D_{AP} : Demanda de alumbrado público (kW)

FP : Factor de potencia (0,95)

La demanda de pérdidas técnicas resistivas se calcula multiplicando la demanda máxima diversificada por el porcentaje de pérdidas técnicas del 3,6 %.

La demanda correspondiente al alumbrado público es característica de cada proyecto. Las potencias nominales de las luminarias de vapor de sodio de alta presión son 400 W, 250 W, 150 W y 100 W. Estos valores están regidos en la normativa para Sistemas de Distribución de la Empresa Eléctrica Quito S.A.

El valor de demanda estimado para este caso, es de 20720 kVA, con lo cual se puede establecer las potencias nominales de las fuentes de generación renovables.



Figura 3 - Conexiones Posibles entre puntos de Generación y puntos de Carga

micro turbina produce 1 MVA de potencia,

con lo cual se puede tener un esquema de conexiones aptas para ser optimizadas.

Se propone una planta de Biomasa la cual estará entregando una potencia neta de 10 MVA.

Todas las generaciones ingresan a la red a través de un transformador de 13.8 kV en el secundario.

Las cuatro generaciones en conjunto disponen de 21250 MVA con lo cual se puede alimentar a la zona seleccionada.

Las generaciones planteadas se muestran en la Figura 2.

El área seleccionada para efectos de la optimización, se ha dividido en áreas de servicio o áreas de cobertura, estas áreas serán representadas por un nodo de carga o centro de carga, y a los transformadores serán representados como puntos de Generación, debido a que estos provienen directamente de las fuentes de energía renovables; solo con fines de representar a los usuarios de cada área con un solo punto específico, de esta manera se tiene puntos de Generación y puntos de Carga,

Para este caso, se realizará una minimización de los costos de producción de la energía que se envían a los puntos de Carga, lo cual se ha propuesto un impuesto a cobrar en función de la distancia (cuanto más distante entre un punto de Generación y un punto de carga sea, mayor será el impuesto); estos impuestos son un porcentaje en función de los precios de la producción por parte de fuentes de energía renovables, los cuales a su vez, están establecidos como normativas en el país en la Regulación No. CONELEC – 009/06; las horas de funcionamiento o Régimen Óptimo de funcionamiento de las energías renovables están en base al Plan Maestro de Electrificación 2013 – 2022 – CONELEC.

Con estos parámetros de precios y las horas de funcionamiento se desarrolla los precios anuales de la producción de la energía, mediante la ecuación (5).

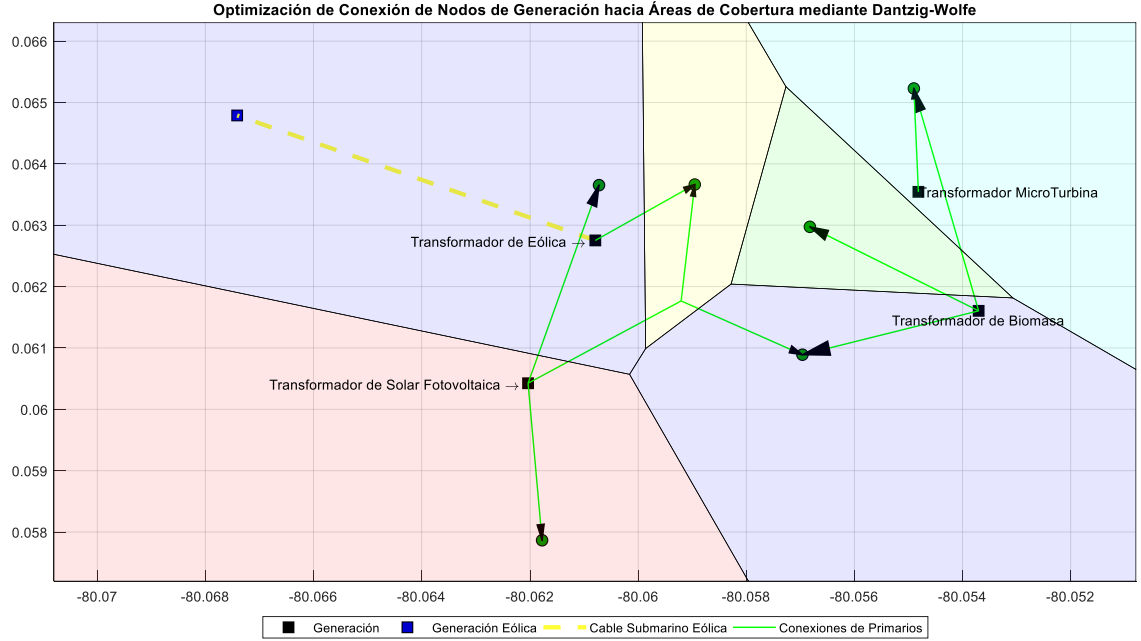


Figura 4 - Optimización de Conexiones de los puntos de Generación y puntos de Carga

Entonces, la función objetivo está definida por la ecuación (6)

$$Costanual_{ij} = P_{er} * (1 + Imp_{ij}) * Rf$$

(5)

Donde:

$Costanual_{ij}$: Costo anual de producción energética incluido impuesto en función de la distancia del punto de Generación hacia el punto de Carga

P_{er} : Precio de producción de energías renovables

Imp_{ij} : Impuesto en función de la distancia

Rf : Régimen óptimo de funcionamiento del tipo de generación en 1 año.

Con los precios obtenidos entre punto de Generación hacia el punto de Carga, se estructurará la función objetivo, la cual como se mencionó anteriormente, es minimizar los costos de producción energética.

$$\min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Costanual_{ij} * Pp_i$$

(6)

Donde:

i : Punto de Generación

j : Punto de Carga

M : Dimensión del vector de puntos de Generación

N : Dimensión del vector de puntos de Carga

$Costanual_{ij}$: Costo anual de producción energética incluido impuesto en función de la distancia del punto de Generación hacia el punto de Carga

Pp_i : Potencia necesaria a producir por cada punto de Generación

Las restricciones del problema son las demandas de cada área, para lo cual la potencia de cada punto de Generación debe satisfacer la demanda del o de los puntos de Carga, como se observa en la ecuación (7).

$$\sum_{i=1}^M Pp_i \geq Pd_j$$

(7)

Donde:

Pd_j : Demanda de cada punto de Carga

Además de las restricciones de que la suma de cada potencia enviada de un punto de Generación hacia un punto de Carga nunca debe superar la potencia total de ese punto de Generación, como se describe en la ecuación (8)

$$\sum_{i=1}^M Pp_{ij} \leq Pp_i$$

(8)

Donde:

Pp_{ij} : Potencia de cada punto de Generación hacia cada punto de Carga.

El cálculo de la demanda de cada área o punto de Carga se lo determina dividiendo el número de viviendas totales utilizando el método de K-Means.

Algoritmo 2: Ubicación óptima de los Puntos de Carga

Inicio

Inicialización

Cargar escenario.mat

Almacenar celdas de Casas en variable Casas

$xs0=Casas(:,1);$

$ys0=Casas(:,2);$

Buscar Casas y contabilizarlas

$xs=xs0(\text{find}(xs0 \sim 0));$

$ys=ys0(\text{find}(ys0 \sim 0));$

Armar Matriz S

$S=[xs,ys];$

Designar un número de agrupaciones o clusterización

$\text{cluster}=6;$

Mostrar Estadísticas Iterativas

$\text{opts} = \text{statset}('Most','iteración');$

$[idx,C,\text{sumd},d] =$

$\text{kmeans}(S,\text{cluster},\text{'Distance'},\text{'cityblock'},\text{'Options'},\text{opts});$

Las conexiones posibles entre puntos de Generación y puntos de Carga se muestran en la Figura 3.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego de que se obtuvo los resultados de la optimización mediante el método de Dantzig-Wolfe, se tiene una matriz de conectividad, la cual, al exportarla en el programa de clusterización original, tenemos una conexión ideal como se muestra en la Figura 4.

Idealmente esta conexión resultaría la conexión final del sistema, sin embargo, se debe adecuar las conexiones de manera georreferenciada para que los cables de conexión recorran por las calles ubicados en postes, así como también, no deben cruzar ninguna conexión por las condiciones físicas del lugar seleccionado.

En la Figura 5 se muestra el escenario final, con las conexiones georreferenciadas de los primarios, de esta manera, las conexiones cumplen con

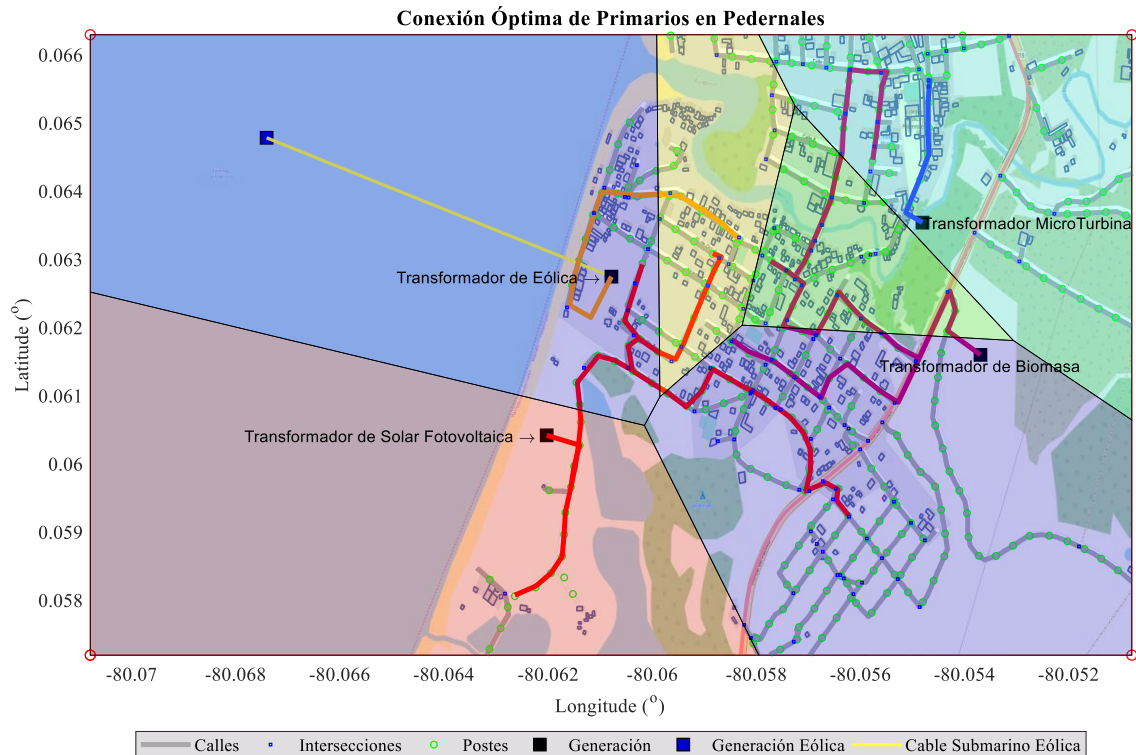


Figura 5 - Distribución Óptima de los Primarios o Conexiones en Pedernales el objetivo de llegar a su destino sin tener Cargas y Líneas de Conexión que se cruzarse con otro primario. respectivamente.

Con esto se finaliza la optimización de las conexiones de cada punto de Generación hacia cada punto de Carga en función de la distancia que tiene que recorrer.

Para comprender si es adecuada o no la aplicación del método de Dantzig-Wolfe ante caídas de tensión, se hará un análisis de flujo de potencia en el software DIgSilent Power Factory para este escenario, antes y después de la optimización, para lo cual se definirán valores como frecuencia de 60 Hz, el voltaje de todo el sistema es de 13.8 kV como se había explicado anteriormente.

En las tablas 1, 2 y 3 se muestra los valores con los que se realizan el análisis de flujo de potencia de Generadores,

Tabla 1 - Datos de Generadores

Tipo de Tecnología de Generación	Total (kW)
Eólica Offshore	2250
Solar Fotovoltaica	8000
Micro Turbina	1000
Biomasa	10000
Total	21250

Tabla 2 - Datos de Cargas

	Demanda (MVA)	Factor de Potencia
Punto de Carga 1	4.165	0.8
Punto de Carga 2	4.165	0.78
Punto de Carga 3	4.55	0.83
Punto de Carga 4	0.7	0.72
Punto de Carga 5	4.13	0.85
Punto de Carga 6	3.01	0.76
Total	20.72	

Tabla 3 - Datos de Líneas de Conexión

	Impedancia de la Línea de Conexión (Z) (ohm/km)		Distancia de la Línea de Conexión (km)
	Resistencia (R)	Reactancia (jX)	
G1-N1	0.821	0.223	0.441952
G1-N2	0.821	0.223	0.227928
G1-N3	0.821	0.223	0.474042
G1-N4	0.821	0.223	0.554863
G1-N5	0.821	0.223	0.71091
G1-N6	0.821	0.223	0.100555
G2-N1	0.821	0.223	0.645545
G2-N2	0.821	0.223	0.497402
G2-N3	0.821	0.223	0.567245
G2-N4	0.821	0.223	0.286312
G2-N5	0.821	0.223	0.957179
G2-N6	0.821	0.223	0.387957
G3-N1	0.821	0.223	0.232301
G3-N2	0.821	0.223	0.46077
G3-N3	0.821	0.223	0.379683
G3-N4	0.821	0.223	0.999531
G3-N5	0.821	0.223	0.187722
G3-N6	0.821	0.223	0.657231
G4-N1	0.821	0.223	0.379844
G4-N2	0.821	0.223	0.62834
G4-N3	0.821	0.223	0.371524
G4-N4	0.821	0.223	0.99045
G4-N5	0.821	0.223	0.425045
G4-N6	0.821	0.223	0.814187

4.1 Antes de la Optimización

La simulación de flujo de potencia se considera conectando todos los puntos de Generación hacia todos los puntos de Carga, como se muestra en la Figura 6.

4.2 Después de la Optimización

La simulación de flujo de potencia se considera sin conectar los puntos de Generación que resultaron no apropiados para la conexión una vez aplicado el método de Dantzig-Wolfe, como se muestra en matriz de conectividad de la tabla 4.

Tabla 4 - Matriz de Conectividad

	Eólica Offshore	Solar Fotovoltaica	Micro-Turbina	Biomasa
Área 1	0	0	0	1
Área 2	1	1	0	0
Área 3	0	1	0	1
Área 4	0	1	0	0
Área 5	0	0	1	1
Área 6	0	1	0	0

El SED para este caso se muestra en la Figura 7.

4.3 Análisis de Caídas de Tensión, Cargabilidad y Pérdidas del SED

Posterior a los análisis de flujo de potencia antes y después de la optimización mediante el método de Dantzig-Wolfe, se obtiene los datos de voltajes en por unidad, las saturaciones de las conexiones y las pérdidas en las conexiones.

Mediante estos resultados obtenidos en el software DIgSilent Power Factory se los envía a Matlab mediante DPL para la realización de las métricas correspondientes; donde se aprecia que los voltajes antes de la optimización están estables y mantienen el valor de 1 en por unidad, y luego de la optimización, estos valores permanecen estables a 1 en por unidad, teniendo en cuenta que las únicas diferencias se dan en la variación de los ángulos, siendo los más altos en el punto de Generación 1 y el punto de Carga 2 con un valor de 2.76 grados, y esto se aprecia en la Figura 8.

La cargabilidad antes de la optimización se aprecia que las conexiones tienen un correcto desempeño, con la excepción de todas aquellas conexiones que salen desde el punto de Generación 4 que para este caso es la Generación a partir de Biomasa, inicialmente esto se da porque este generador al ser de mayor capacidad, se ha establecido como barra slack del SED y es el que mayor aporte energético entrega al SED; por otra parte, luego de la optimización se aprecia que ya se han saturado ligeramente las conexiones óptimas y la que más carga tiene es la conexión que parte desde el punto de Generación 4 hacia el punto de Carga 3, con un valor de 52.02 %; esto se puede apreciar en la Figura 9.

Las potencias que se obtienen en las líneas de conexión son consideradas como pérdidas, y en la Figura 10, esto se ve reflejado a través de la potencia reactiva; antes de la optimización se observa de igual manera que en la cargabilidad, todas las conexiones que parten desde el punto de Generación 4 tienen muchos reactivos, debido a que este generador debe compensar de reactivos al SED; después de la optimización las pérdidas de la misma manera se incrementan llegando a un valor máximo de 12.43 MVAR en la línea de conexión que parte desde el punto de Generación 4 hacia el punto de Carga 3.

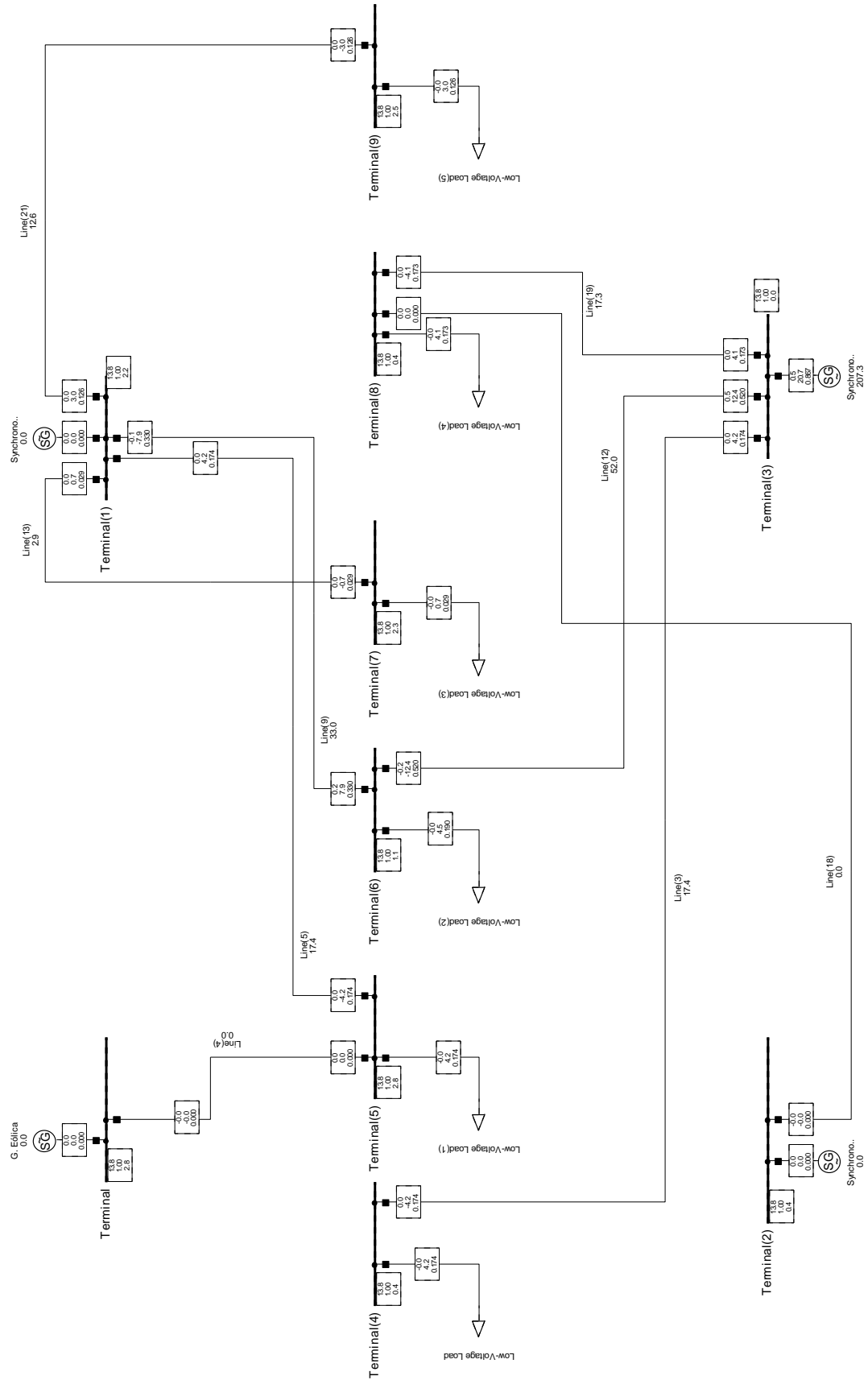


Figura 7 - Simulación de SEP después de la Optimización

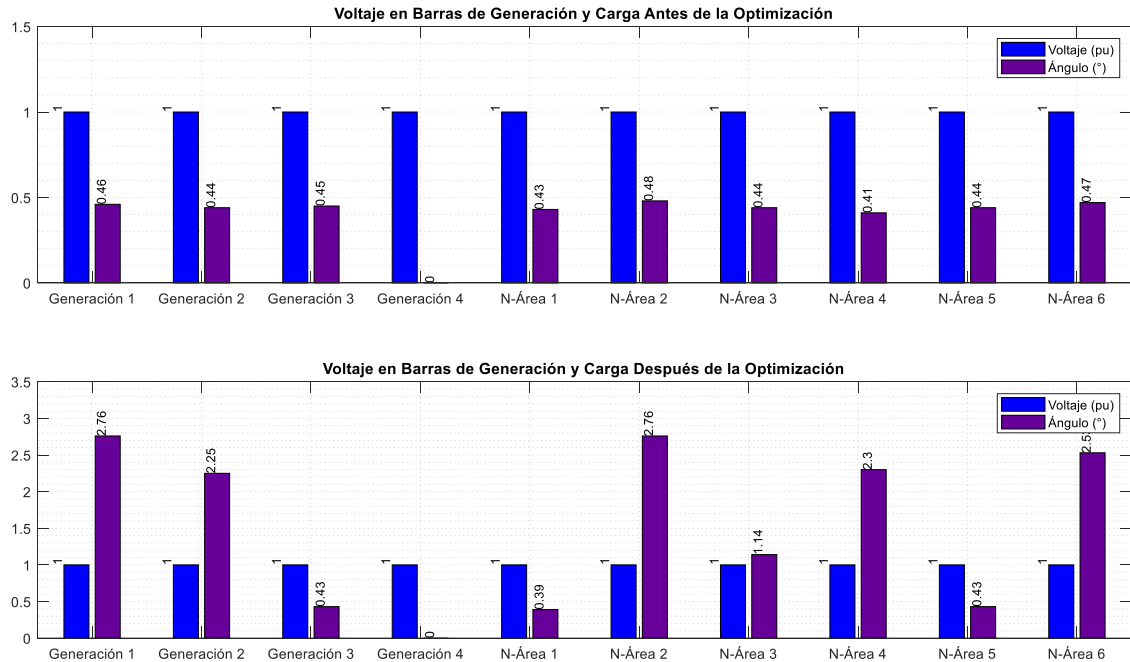


Figura 8 - Voltaje en Barras de Generación y Nodos de Carga

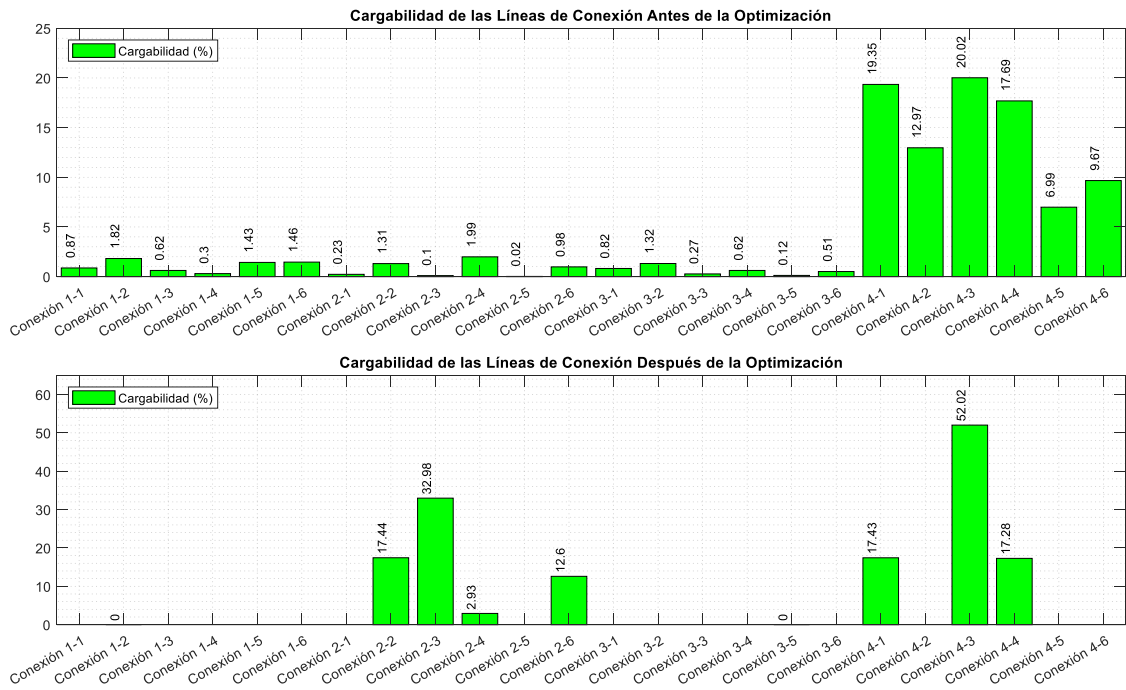


Figura 9 – Cargabilidad de Líneas de Conexión

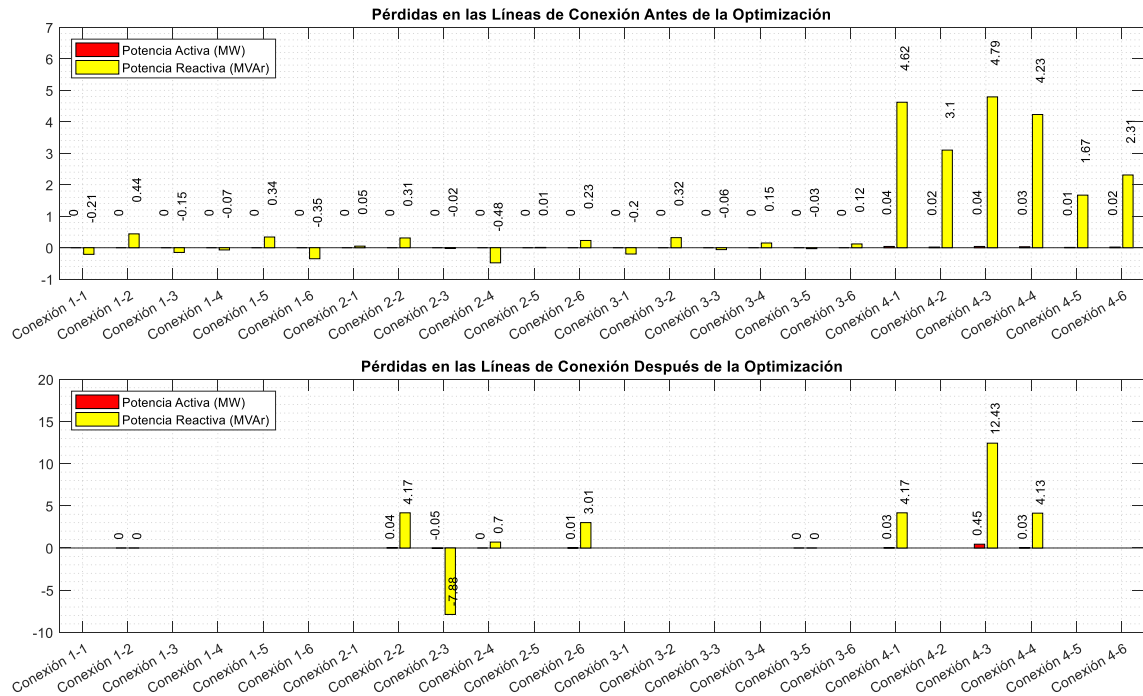


Figura 10 – Pérdidas en Líneas de Conexión

5 CONCLUSIONES

Ante la amplia posibilidad de la aplicación de métodos de problemas lineales en los Sistemas Eléctricos de Distribución para el análisis de la expansión de la red, la inclusión de Generación Distribuida, entre otros; permiten que estos análisis sean mucho más eficientes, debido a que estos métodos abarcan mucha más información y reducen tiempo de análisis.

El método de Dantzig-Wolfe que se ha verificado en este aspecto eléctrico, denota ciertas ventajas en el momento de optimizar, recalando que no solo puede enfocarse en la parte de distribución, al contrario, también puede establecerse en cualquier parte la red eléctrica así como en la parte administrativa, debido a su gran capacidad de trabajo frente a variables extensas que se presenten en el problema, sin embargo, se debe

considerar la estructura con la que funciona este método, esto recae específicamente en las condiciones o restricciones del problema, para que el resultado sea el adecuado, se destaca además, el método de Dantzig-Wolfe en software resuelve sin problemas, a diferencia de funciones nativas como linprog por ejemplo, la cual esta deja de ser óptima a gran escala, y los tiempos de máquina si bien es cierto son mucho más cortos que el método Dantzig-Wolfe, los valores resultantes dejan de ser los mejores, a diferencia de los valores resultantes con el método de Dantzig-Wolfe.

Como última instancia con respecto al método de Dantzig-Wolfe, se puede mejorar su tiempo de máquina aumentando el número de subproblemas, esto siempre y cuando se mantenga la estructura con la que este funciona, debido a que esta es la parte más compleja de todo el proceso.

Basándose en las métricas obtenidas se concluye que las caídas de tensión, el voltaje en por unidad permanece estable antes y después de la optimización, siendo estos valores de 1 en por unidad para todos los puntos de Generación y Carga presentes en el sistema, sin embargo, los valores de ángulos de desfase de voltajes si muestran una variación relevante, siendo los más altos en el punto de Generación 1 y el punto de Carga 2 con un valor de 2.76 grados.

Para las métricas de cargabilidad de las líneas de conexión, se aprecia que las únicas conexiones con mayor incremento después de la optimización son las que se despliegan desde el punto de Generación 4 debido a que el generador ubicado en este punto de Generación es el de mayor capacidad y consecuentemente, se considera a este punto de conexión como una barra slack del SED; siendo la conexión que parte desde el punto de Generación 4 hacia el punto de Carga 3, con un valor de 52.02 % con el valor más alto.

Para las métricas de pérdidas de potencias en las líneas de conexión, las conexiones que parten desde el punto de Generación 4 tienen reactivos moderadamente elevados, debido a que el generador en este punto de Generación debe compensar de reactivos al SED, llegando a un valor máximo de 12.43 MVAR en la línea de conexión que parte desde el punto de Generación 4 hacia el punto de Carga 3.

5.1 Investigaciones Posteriores

Para investigaciones futuras a nivel de pregrado se recomienda:

- Considerar otras variables que impliquen el desarrollo de una red de generación distribuida, pero que conserven la estructura y las limitaciones del método de Dantzig-Wolfe.
- Considerar que las limitaciones de gran impacto que tiene el método de Dantzig-Wolfe, es que cuando se establece las ecuaciones de condiciones y restricciones en un ejemplo de casos reales, la mayoría no cumplen con el número de ecuaciones que necesita el método de Dantzig-Wolfe, debido a que la dimensión de los subproblemas va estrechamente relacionado con la dimensión del problema maestro, esto no se refleja en ejemplos planteados en artículos o libros, debido a que son ejemplos de máximo cuatro variables, lo que dificulta el entendimiento inicial al plantear el número de ecuaciones.

6 REFERENCIAS

- [1] S. N. Ravadanegh y R. G. Roshanagh, «On optimal multistage electric power distribution networks expansion planning», *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 54, pp. 487-497, ene. 2014.
- [2] J. Abdallah, «Distribution Network Planning and Design Using Branch and Bound Methods», *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 2, n.º 3, pp. 644-647, mar. 2005.
- [3] R. C. Lotero y J. Contreras, «Distribution System Planning With Reliability», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, n.º 4, pp. 2552-2562, oct. 2011.
- [4] V. Parada, J. A. Ferland, M. Arias, P. Schwarzenberg, y L. Vargas,

- «Heuristic Determination of Distribution Trees», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, n.º 2, pp. 861-869, abr. 2010.
- [5] R. A. Jabr, «Polyhedral Formulations and Loop Elimination Constraints for Distribution Network Expansion Planning», *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, n.º 2, pp. 1888-1897, may 2013.
- [6] A. R. Jordehi, «Optimisation of electric distribution systems: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1088-1100, nov. 2015.
- [7] D. M. Jovanovic, «Planning of optimal location and sizes of distribution transformers using integer programming», *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 25, n.º 9, pp. 717-723, nov. 2003.
- [8] J. Shu, R. Guan, y L. Wu, «Optimal power flow in distribution network considering spatial electro-thermal coupling effect», *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, n.º 5, pp. 1162-1169, mar. 2017.
- [9] S. Bahramara y F. G. Mohammadi, «Optimal sizing of distribution network transformers considering power quality problems of non-linear loads», *CIREN - Open Access Proc. J.*, vol. 2017, n.º 1, pp. 2471-2475, oct. 2017.
- [10] J. F. Franco, M. J. Rider, M. Lavorato, y R. Romero, «A mixed-integer LP model for the reconfiguration of radial electric distribution systems considering distributed generation», *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 97, pp. 51-60, abr. 2013.
- [11] J. Widén y E. Wäckelgård, «A high-resolution stochastic model of domestic activity patterns and electricity demand», *Appl. Energy*, vol. 87, n.º 6, pp. 1880-1892, jun. 2010.
- [12] M. Prodanović, K. De Brabandere, J. Van den Keybus, T. Green, y J. Driesen, «Harmonic and reactive power compensation as ancillary services in inverter-based distributed generation», *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 1, n.º 3, p. 432, 2007.
- [13] H. M. Ayres, W. Freitas, M. C. De Almeida, y L. C. P. Da Silva, «Method for determining the maximum allowable penetration level of distributed generation without steady-state voltage violations», *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 4, n.º 4, p. 495, 2010.
- [14] P. Mallet, P.-O. Granstrom, P. Hallberg, G. Lorenz, y P. Mandatova, «Power to the People!: European Perspectives on the Future of Electric Distribution», *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 12, n.º 2, pp. 51-64, mar. 2014.
- [15] E. A. Martínez Ceseña y P. Mancarella, «Practical recursive algorithms and flexible open-source applications for planning of smart distribution networks with Demand Response», *Sustain. Energy Grids Netw.*, vol. 7, pp. 104-116, sep. 2016.
- [16] J. Nahman y D. Perić, «Path-set based optimal planning of new urban distribution networks», *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 85, pp. 42-49, feb. 2017.
- [17] W. Pavón, E. Inga, y S. Simani, «Optimal Routing an Ungrounded Electrical Distribution System Based on Heuristic Method with Micro Grids Integration», *Sustainability*, vol. 11, n.º 6, p. 1607, mar. 2019.
- [18] J. Salehi y M.-R. Haghifam, «Long term distribution network planning

- considering urbanity uncertainties», *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 42, n.º 1, pp. 321-333, nov. 2012.
- [19] M. Esmaeeli, A. Kazemi, H. Shayanfar, G. Chicco, y P. Siano, «Risk-based planning of the distribution network structure considering uncertainties in demand and cost of energy», *Energy*, vol. 119, pp. 578-587, ene. 2017.
- [20] S. U. Ngueveu, C. Artigues, y P. Lopez, «Scheduling under a non-reversible energy source: An application of piecewise linear bounding of non-linear demand/cost functions», *Discrete Appl. Math.*, vol. 208, pp. 98-113, jul. 2016.
- [21] C. da S. Jardim, R. Rüther, I. T. Salamoni, T. de S. Viana, S. H. Rebechi, y P. J. Knob, «The strategic siting and the roofing area requirements of building-integrated photovoltaic solar energy generators in urban areas in Brazil», *Energy Build.*, vol. 40, n.º 3, pp. 365-370, ene. 2008.
- [22] S. J. Steffel, P. R. Caroselli, A. M. Dinkel, J. Q. Liu, R. N. Sackey, y N. R. Vadhar, «Integrating Solar Generation on the Electric Distribution Grid», *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, n.º 2, pp. 878-886, jun. 2012.
- [23] W. D. P. Vallejos, «Standalone photovoltaic system, using a single stage boost DC/AC power inverter controlled by a double loop control», en *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, Quito, 2017, pp. 1-6.
- [24] O. Tietjen, M. Pahle, y S. Fuss, «Investment risks in power generation: A comparison of fossil fuel and renewable energy dominated markets», *Energy Econ.*, vol. 58, pp. 174-185, ago. 2016.
- [25] J. Haakana, J. Lassila, S. Honkapuro, y J. Partanen, «Renovation strategies and economic regulation in electricity distribution», *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 6, n.º 10, p. 1019, 2012.
- [26] L. Hong, L. Zhong-hua, y C. Xuebin, «The Applications and Trends of High Performance Computing in Finance», en *2010 Ninth International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science*, Hong Kong, China, 2010, pp. 193-197.
- [27] A. A. S. Leao, M. M. Furlan, y F. M. B. Toledo, «Decomposition methods for the lot-sizing and cutting-stock problems in paper industries», *Appl. Math. Model.*, vol. 48, pp. 250-268, ago. 2017.
- [28] M. Gamst, «Exact and heuristic solution approaches for the Integrated Job Scheduling and Constrained Network Routing Problem», *Discrete Appl. Math.*, vol. 164, pp. 121-137, feb. 2014.
- [29] L. E. Sokoler, L. Standardi, K. Edlund, N. K. Poulsen, H. Madsen, y J. B. Jørgensen, «A Dantzig-Wolfe decomposition algorithm for linear economic model predictive control of dynamically decoupled subsystems», *J. Process Control*, vol. 24, n.º 8, pp. 1225-1236, ago. 2014.
- [30] X. Diao y C.-H. Chen, «A sequence model for air traffic flow management rerouting problem», *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 110, pp. 15-30, feb. 2018.
- [31] A. Flores-Quiroz, R. Palma-Behnke, G. Zakeri, y R. Moreno, «A column generation approach for

- solving generation expansion planning problems with high renewable energy penetration», *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 136, pp. 232-241, jul. 2016.
- [32] P. McNamara y S. McLoone, «Hierarchical Demand Response for Peak Minimization Using Dantzig–Wolfe Decomposition», *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, n.º 6, pp. 2807-2815, nov. 2015.
- [33] C. A. Irawan, D. Ouelhadj, D. Jones, M. Stålhane, y I. B. Sperstad, «Optimisation of maintenance routing and scheduling for offshore wind farms», *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 256, n.º 1, pp. 76-89, ene. 2017.
- [34] G. B. Dantzig y P. Wolfe, «Decomposition Principle for Linear Programs», *Oper. Res.*, vol. 8, n.º 1, pp. 101-111, feb. 1960.
- [35] R. H. Kwon, *Introduction to Linear Optimization and Extensions with MATLAB®*, 1.^a ed. CRC Press, 2013.
- [36] J. Gou, Z. Yi, L. Du, y T. Xiong, «A Local Mean-Based k-Nearest Centroid Neighbor Classifier», *Comput. J.*, vol. 55, n.º 9, pp. 1058-1071, sep. 2012.
- [37] R. Li, W. Wang, y M. Xia, «Cooperative Planning of Active Distribution System With Renewable Energy Sources and Energy Storage Systems», *IEEE Access*, vol. 6, pp. 5916-5926, 2018.

6.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 5. Matriz de Estado del Arte

PLANEACIÓN ÓPTIMA DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA USANDO DANTZIG-WOLFE																			
	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA		
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Planeación de Redes de Distribución	Flujos de Potencia	Método de Descomposición de Dantzig-Wolfe	Generación Distribuida	Expansión de la red de Distribución	Cargabilidad de las líneas de conexión	Energías Alternativas	Determinación de Variables Entrantes	Cargabilidad de líneas de Conexión	Límite de flujo de Potencia en Nodos de Generación	Límite de flujo de Potencia en Nodos de Carga	Descomposición de Dantzig-Wolfe	LinProg	Límites de Cargabilidad en Líneas de Conexión	Obtención del Máximo Beneficio	Optimización mediante el Método de Descomposición de Dantzig-Wolfe
1	2014	On optimal multistage electric power distribution networks expansion planning	2	✖	✖		✖	✖	✖		✖	✖		✖				✖	
2	2005	Distribution Network Planning and Design Using Branch and Bound Methods	4	✖	✖		✖	✖	✖			✖							
3	2011	Distribution System Planning With Reliability	41	✖	✖		✖	✖											
4	2010	Heuristic Determination of Distribution Trees	8		✖														
5	2013	Polyhedral Formulations and Loop Elimination Constraints for Distribution Network Expansion Planning	33	✖	✖		✖	✖			✖			✖					
6	2015	Optimisation of electric distribution systems: A review	28	✖	✖		✖	✖			✖			✖					
7	2003	Planning of optimal location and sizes of distribution transformers using integer programming	17	✖	✖			✖			✖			✖					
8	2017	Optimal power flow in distribution network considering spatial electro-thermal coupling effect	5	✖	✖		✖		✖			✖					✖		

9	2017	Optimal sizing of distribution network transformers considering power quality problems of non-linear loads	0	✗	✗			✗	✗		✗	✗		✗					
10	2013	A mixed-integer LP model for the reconfiguration of radial electric distribution systems considering distributed generation	97	✗	✗			✗	✗		✗	✗							
11	2010	A high-resolution stochastic model of domestic activity patterns and electricity demand	411	✗			✗	✗											
12	2007	Harmonic and reactive power compensation as ancillary services in inverter-based distributed generation	125	✗			✗	✗		✗									
13	2010	Method for determining the maximum allowable penetration level of distributed generation without steady-state voltage violations	135	✗			✗	✗											
14	2014	Power to the People!: European Perspectives on the Future of Electric Distribution	15	✗	✗		✗	✗											
15	2016	Practical recursive algorithms and flexible open-source applications for planning of smart distribution networks with Demand Response	13	✗	✗		✗	✗			✗								
16	2017	Path-set based optimal planning of new urban distribution networks	6	✗	✗		✗	✗											
17	2019	Optimal Routing an Ungrounded Electrical Distribution System Based on Heuristic Method with Micro Grids Integration	0	✗	✗		✗	✗	✗										
18	2012	Long term distribution network planning considering urbanity uncertainties	2	✗			✗	✗											
19	2017	Risk-based planning of the distribution network structure considering uncertainties in demand and cost of energy	11	✗	✗		✗	✗	✗			✗						✗	
20	2016	Scheduling under a non-reversible energy source: An application of piecewise linear bounding of non-linear demand/cost functions	6			✗				✗				✗				✗	✗
21	2008	The strategic siting and the roofing area requirements of building-integrated photovoltaic solar energy generators in urban areas in Brazil	47				✗			✗								✗	

22	2012	Integrating Solar Generation on the Electric Distribution Grid	31	✗	✗		✗	✗		✗							✗	
23	2017	Standalone Photovoltaic System, using a Single Stage Boost DC/AC Power Inverter Controlled by a Double Loop Control	0		✗		✗			✗								
24	2016	Investment risks in power generation: A comparison of fossil fuel and renewable energy dominated markets	20				✗			✗							✗	
25	2012	Renovation strategies and economic regulation in electricity distribution	7	✗	✗		✗	✗			✗						✗	
26	2010	The Applications And Trends Of High Performance Computing In Finance	5			✗				✗				✗			✗	✗
27	2017	Decomposition methods for the lot-sizing and cutting-stock problems in paper industries	7			✗				✗				✗				✗
28	2014	Exact and heuristic solution approaches for the Integrated Job Scheduling and Constrained Network Routing Problem	2			✗				✗				✗				✗
29	2014	A Dantzig-Wolfe Decomposition Algorithm for Linear Economic Model Predictive Control of Dynamically Decoupled Subsystems	7			✗				✗				✗			✗	✗
30	2018	A sequence model for air traffic flow management rerouting problem	1			✗				✗				✗				✗
31	2016	A column generation approach for solving generation expansion planning problems with high renewable energy penetration	23	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗		✗	✗
32	2015	Hierarchical Demand Response for Peak Minimization Using Dantzig–Wolfe Decomposition	19	✗	✗	✗		✗			✗			✗	✗			✗
33	2017	Optimisation of maintenance routing and scheduling for offshore wind farms	39		✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗
34	1960	Decomposition Principle for Linear Programs	2880			✗				✗				✗				✗
35	2013	Introduction to Linear Optimization and Extensions with MATLAB	4			✗				✗				✗				✗

36	2012	A Local Mean-Based k-Nearest Centroid Neighbor Classifier	50	✖			✖												
37	2017	Cooperative Planning of Active Distribution System with Renewable Energy Sources and Energy Storage Systems	13	✖			✖	✖		✖									
			CANTIDAD:	23	20	11	23	22	8	9	17	7	1	7	11	0	3	8	11

6.2 Resumen de Indicadores

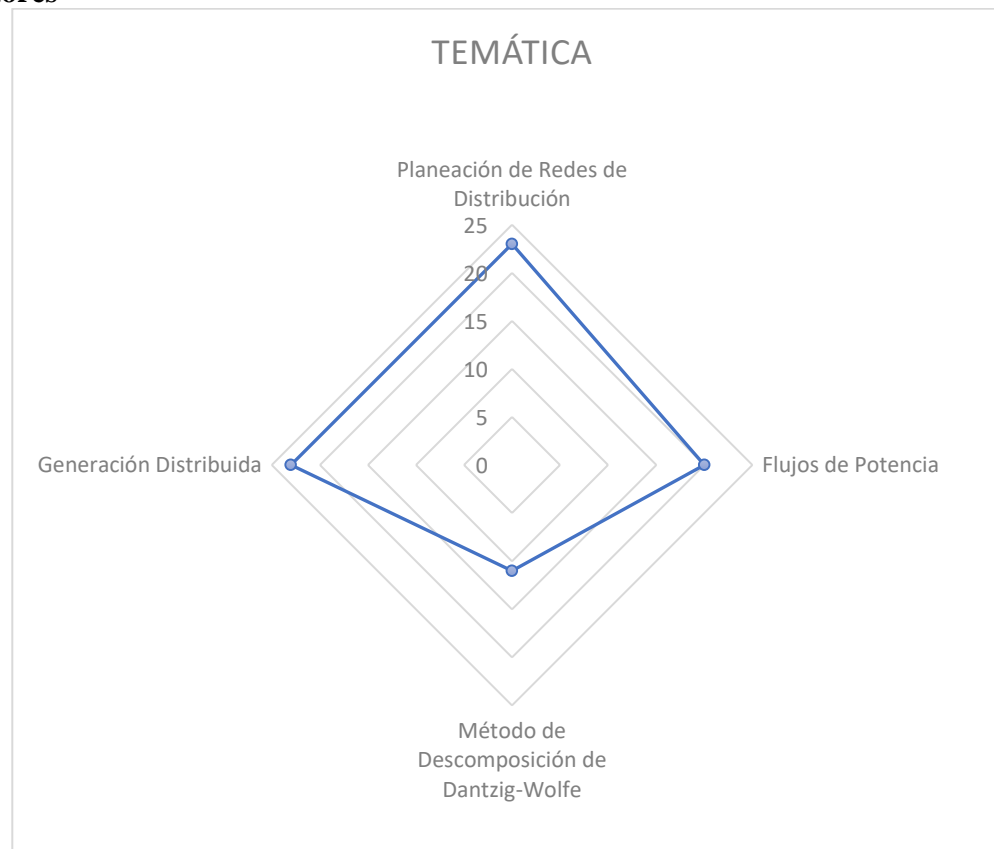


Figura 11. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte

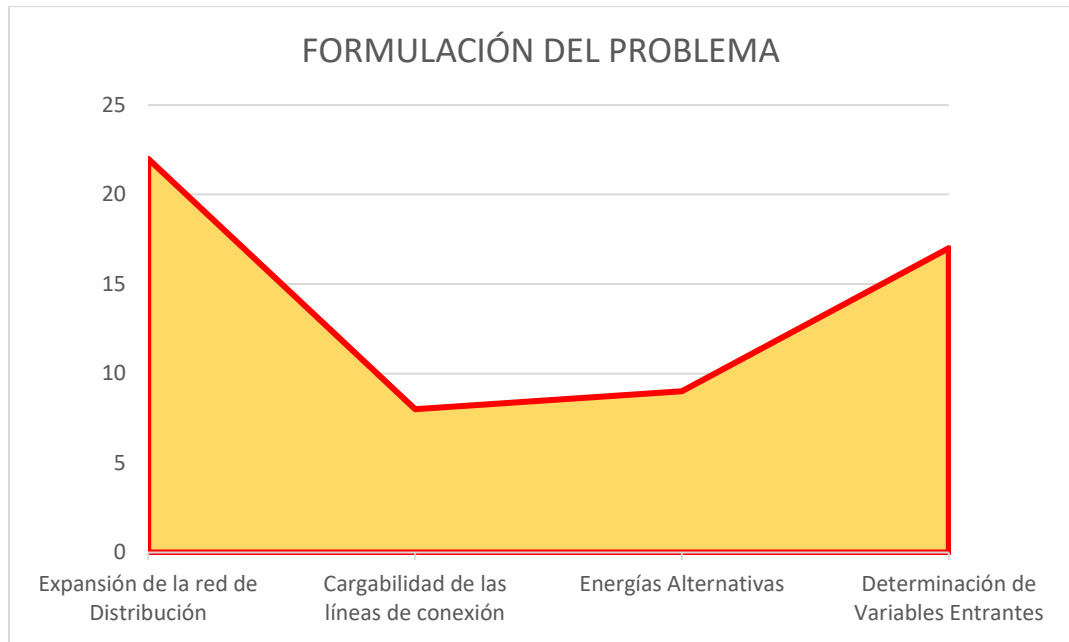


Figura 12. Indicador de formulación del problema - Estado del arte

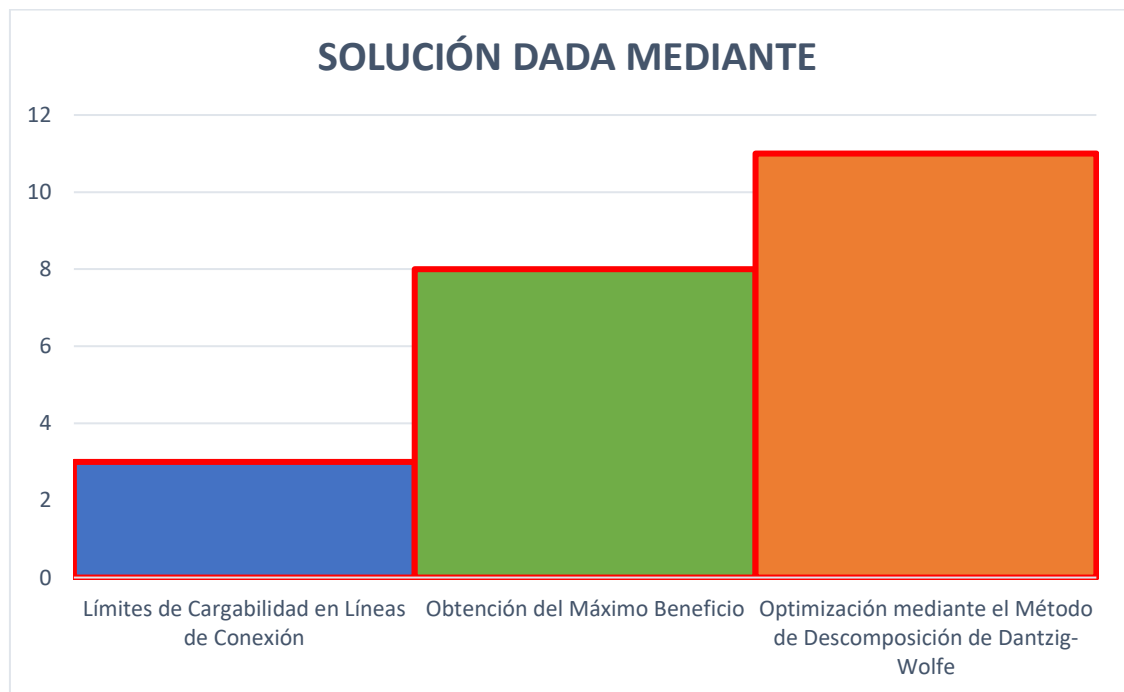


Figura 13. Indicador de solución - Estado del arte